Curso a distancia para “La generación y el uso eficiente del vapor”
año 2007

Modulo 7-COMBUSTION DE LEÑA

LA LEÑA COMO COMBUSTIBLE (o celulósicos en general) y su combustión.

En la combustión **de la leña** (trataremos aquí a la leña de eucaliptos) **, para el ahorro del combustible, también vale la modulación continua** (o sea, que haya una modulación del aire de acuerdo a la necesidad de mantener la presión de la caldera al valor de trabajo con los cambios de carga en el consumo de vapor, manteniendose la leña, en este caso rolos de eucaliptos, en una cantidad casi estable, lo que evita los exceso de aire, como la falta de aire o el disparo de las válvulas de seguridad, todos elementos que producen pérdidas de combustible)**, diferenciandose la forma de quemar : por gasógeno o la quema directa. Las pérdidas fundamentales en la combustión de la leña también son el exceso de aire y en forma muy importante los gases sin quemar, pero no dejan de ser menos importantes en el costo final, el manejo de la leña, tanto en los cortes, el acarreo, o en el secado como en el manejo.**

Si los **gasógenos** se pudieran automatizar con instrumental adecuado (cosa que hemos hecho en instalaciones importantes y hemos logrado ahorros muy importantes), es probable que tecnológicamente parezca más eficiente, pero en la práctica hay otros problemas como veremos, uno de ellos es que la llama secundaría no es visible por lo que **no es muy fácil de controlar** la combustión completa y pueden descargar por la chimenea gases sin quemar (pudiendo ser la pérdida hasta más del 5% por cada 1% de CO en gases secos).

En la **quema directa** la llama es observable, esto permite controlar que la combustión sea completa.

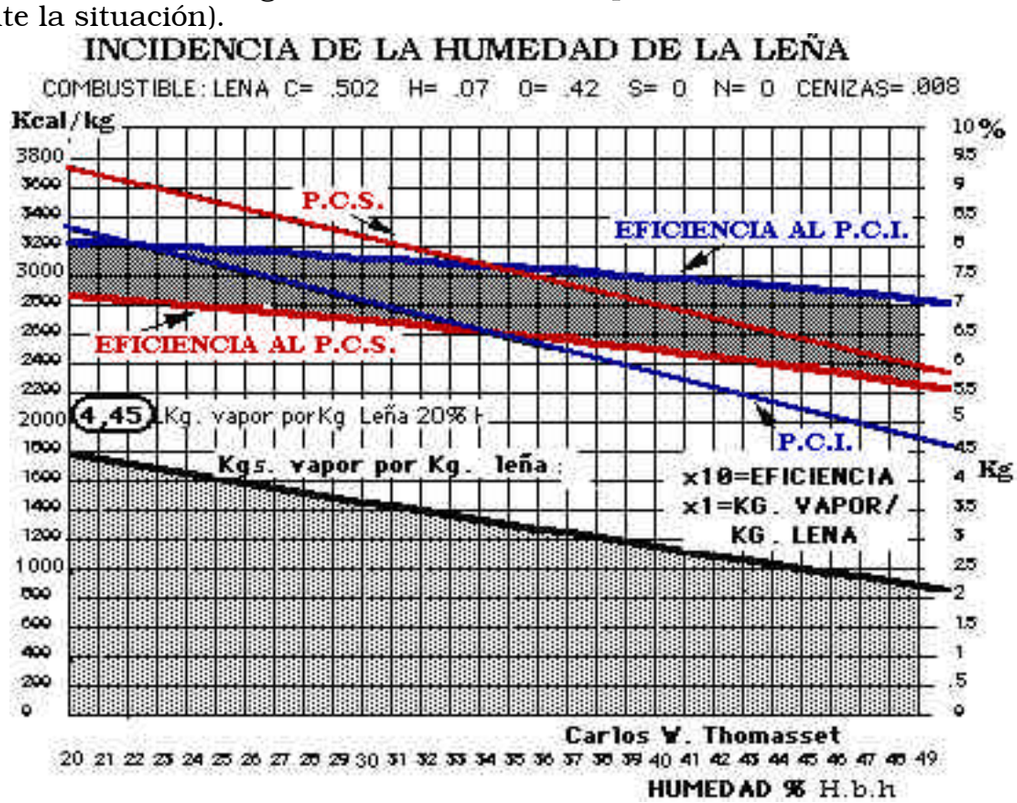
Además se debe considerar el corte de la leña (**rolos cortos** en el gasógenos y **rolos largos** en la quema directa, siendo esta última con menos cortes, lo cual es un ahorro en su adquisición), además la **humedad o tiempo de estacionamiento** juega un rol importante. Los rolos cortos son más difíciles de estacionar, hay mucho laboreo por lo que generalmente se hace a granel, esta disposición con falta de venteo provoca grandes pérdidas por putrefacción (he comprobado hasta un 30% de pérdida en calderas en 6 meses con la descarga a granel de los camiones o sea montones de rolos cortos o astillones), en el caso de rolos largos el estacionamiento por lo general se hace en forma de **pilas ordenadas** lo que hace que la putrefacción sea mínima (por lo general los rolos más bajos en contacto con el suelo, especialmente si el suelo es húmedo o hay mucha vegetación, puede haber algo de putrefacción).

Rolos cortos o astillones bien estibados para secar

Rolos cortos o astillones mal estibados para secar.

O sea, tenemos que evaluar el costo final del consumo de leña desde el monte a la boca de carga de la caldera.

Si bien la leña obliga en el secado a un capital depositado por un tiempo, a veces tan largo como un año (generalmente un verano de secado es suficiente, esto significa más de 6 meses en algunos casos), **se plantea el problema del costo de dicho capital improductivo, pero, si quemamos la leña con una gran humedad** (los rollos de eucaliptos al cortarse tienen una humedad en b.h. de 55% a 60%, en el caso del gasógeno conviene secarlos a menos del 30% H.b.h., pudiéndose en la quema directa, con aire precalentado, quemarse con una humedad de hasta el 35% o más), **se producen grandes pérdidas por el agua que debemos evaporar y sobrecalentar en chimenea, además se generan gases no quemados** (por lo general si la humedad es alta, la combustión no es buena, lo que obliga a un exceso de aire por lo general el doble del % de humedad, así una leña del 35% H. b.h. el aire necesario para una buena combustión sería aproximado al 70% de exceso o de lo contrario aparecen por lo general gases no quemados. En la quema directa, precalentando el aire de combustión, se logra bajar el exceso de aire). **Otras pérdidas importantes se producen en este caso** (quemar con alta humedad) **por el rápido ensuciamiento de las superficies de transferencias y las paradas obligatorias para la limpieza** (con la leña con exceso de humedad, produce una combustión sucia, cuyos gases arrastran “alquitranes” y otros elementos que ensucian rápidamente las superficies, esto obliga a parar con frecuencia la caldera, ya que no solamente baja la eficiencia, sino que hay dificultad para hacer circular los gases de combustión, llegando un momento en que falta exceso de aire, lo cual empeora rápidamente la situación).



En **el gráfico anterior** (a la **izquierda** en las ordenadas, las Kcalorías de los **P.C.**, en la **derecha**, las ordenadas **x10** las **Eficiencias** y por **x1**, los **Kg. de vapor por Kg. de leña**, como abscisas la humedad de la leña en base húmeda: **H.b.h**.), vemos que la humedad de la leña entre 20% H.b.h. a 49%H.b.h., los Poderes caloríficos bajan en una curva descendente (disminuyendo más el P.C.I. debido al contenido del agua por la humedad que aumenta), que hace que la Eficiencias también bajen. **Esto se refleja más en que con una humedad del 20% H.b.h. se producen 4,45 Kg. de vapor por Kg.Leña, pero cuando la humedad aumenta al 49% H.b.h., solamente se pueden producir unos 2,25 Kg.vapor por Kg. de leña** (hemos supuesto que el exceso de aire es el doble que la humedad en %, operando una caldera con valores que se han mantenido constantes, salvo el exceso de aire).

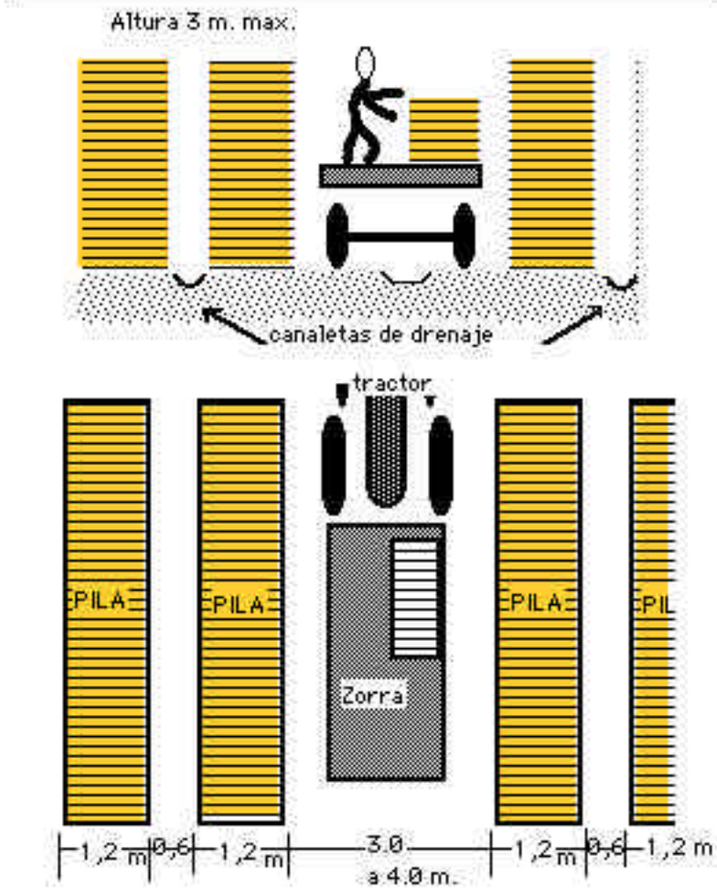
En lo personal, pienso que el mejor negocio, **es llevar la leña a una humedad que permita la combustión completa y con el mínimo exceso de aire**, dando un ensuciamiento

más bajo, **en cada sistema.** (en el gasógeno próximo al 25% H.b.h. y en la quema directa hasta un 30%H.b.h.),buscando **bajar los costos en el acarreo** (**secando en el monte**), regulando la combustión con instrumentos, manteniendo la caldera limpia y operando los más moduladamente posible.

Disposición de las pilas de leña respecto a los vientos

El apilado de la leña para el secado es un tema de primaria importancia, ya que debe haber buena circulación de aire entre los rollos, así evitamos los “microclimas” húmedos, que evitan el secado y aumentan las pérdidas por putrefacción.

Disposición de los rolos de eucaliptus para secado



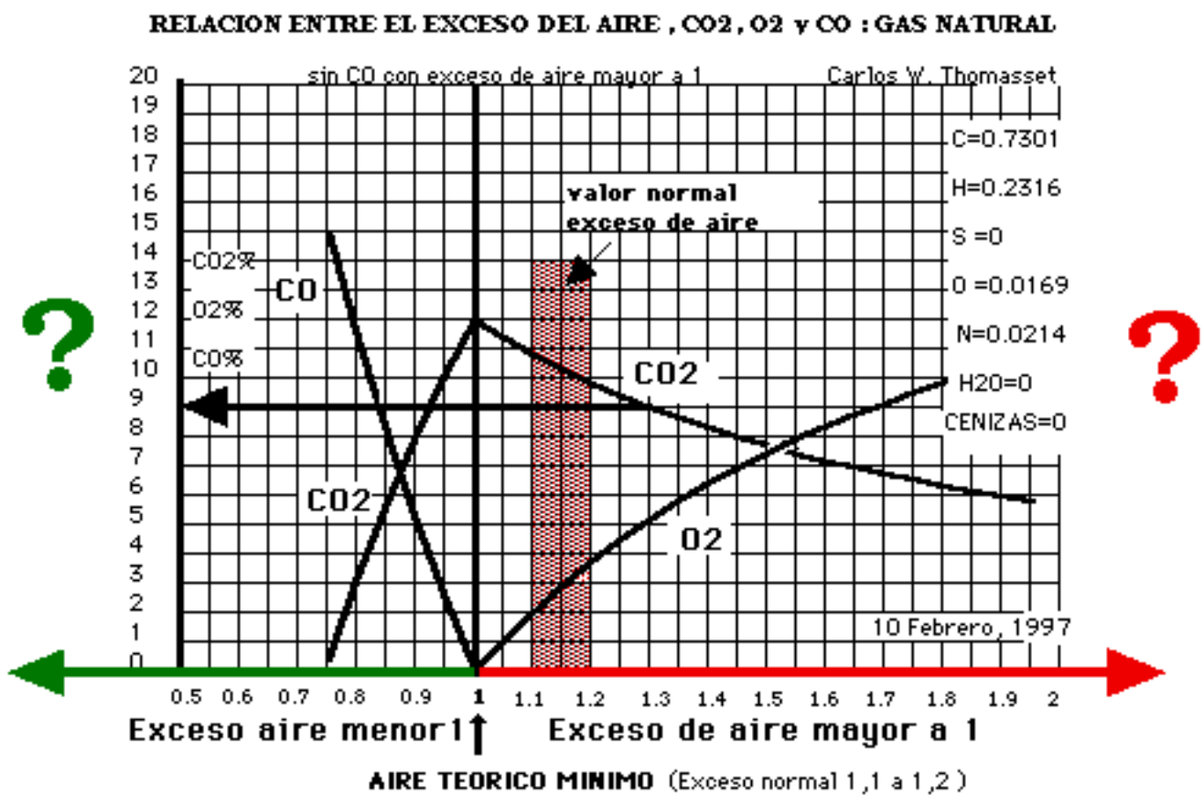
Lamentablemente en este país la leña se acarrea verde, lo cual significa acarrear un 40% más de peso que tiene un costo adicional e inútil.

Es evidente que si la leña **se dejara secar en los campos de corte o próximos a ellos**, no solamente **se acarrearía un 40% menos de peso** (o sea que el costo de las Kilocalorías disponibles en la boca de caldera sería menor), ya que la **incidencia del acarreo**

en la leña es muy grande, sino que también **habría una disminución de acarreo de cáscaras**, cuya combustión no resulta atractiva debido a su alto contenido de elementos que ensucian tanto la parrilla de combustión como las superficies de transferencias (en la cáscara hay gran cantidad de elementos inorgánicos, que forman la ceniza en su mayor parte).

Una solución para alargar los períodos de limpieza en las calderas con la quema de leña (también en algunas cáscaras como el arroz), sería la utilización de elementos que ayuden a que la ceniza no se deposite fácilmente, esto se logra parcialmente, **insuflando pequeñas cantidades de dolomita en polvo fino** (la dolomita, un compuesto de carbonato de calcio y magnesio, altera el punto de fusión de las cenizas e impide que la ceniza se “pegue” fácilmente sobre las superficies frías). Si bien tiene un costo adicional de operación, hay que evaluar que **en la caldera aparecen 3 pérdidas : 1-la EFICIENCIA que irá decayendo a medida que la caldera se ensucia** (sube la temperatura de gases de chimenea y por lo tanto la pérdida), **2- la falta de exceso de aire produce gases sin quemar** (que representan una gran pérdida) **y además : 3-el costo de la parada para la limpieza de la caldera** (que muchas veces lleva varias horas y varias horas-hombres), **lo que lleva por general una parada de producción muy costosa.**

LA COMBUSTION DE LENA y GASES, presenta el problema de que si medimos solo el %CO2, no sabremos con claridad de si hay exceso o falta de aire. Se debe medir tambien el O2. También puede ser controlado midiendo el CO.



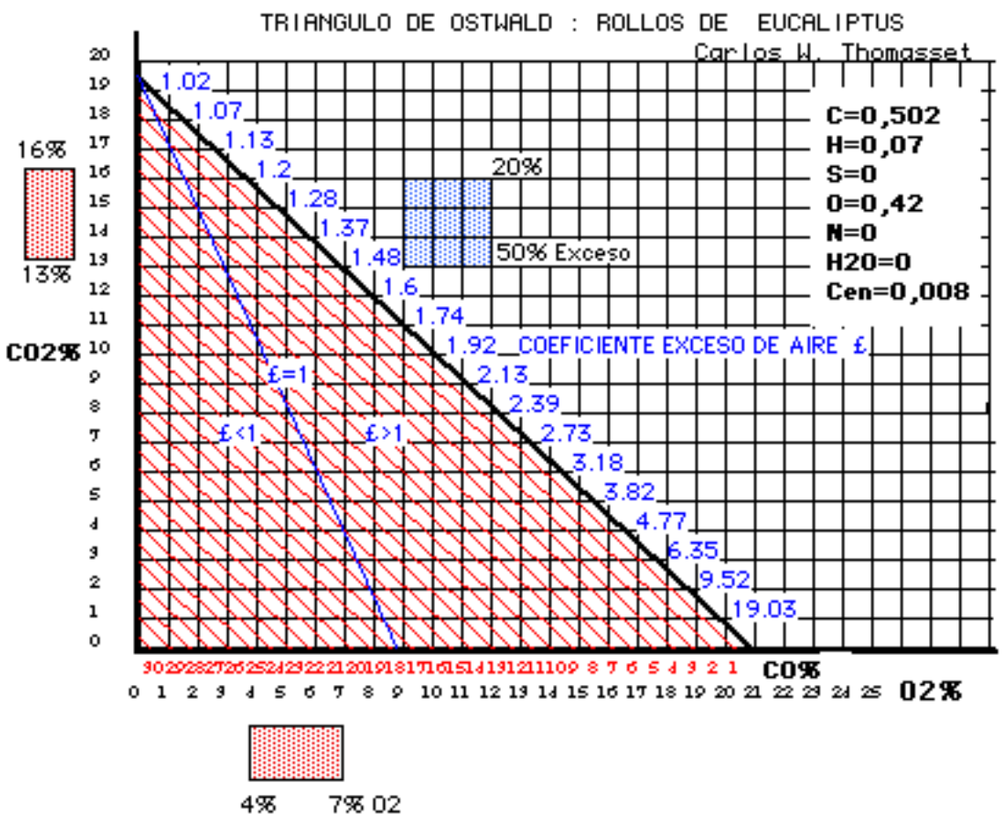
El control de la combustión, además de visual (que solamente es posible en la quema directa) **debe ser hecha con control de instrumentos, midiendo el exceso de aire** (como hemos dicho, depende la humedad de la leña, ya que a mayor humedad, más exceso de aire, podemos decir que el exceso de aire puede ir del 30% al 50%, de acuerdo a una humedad normal (25-30% H.b.h.), ya que si se trabaja por debajo del exceso necesario, se producen gases sin quemar, lo que provoca grandes pérdidas por chimenea).

Modulo 7-COMBUSTION DE LEÑA

La medida de gases en chimenea, cuando se queman celulósicos (y gases)**, si solo se mide el CO2% o el O2%, siempre queda la duda si realmente hay exceso de aire, ya que puede haber oxígeno sobrante al haber mala combustión** (esto ocure en todos los instrumentos comunes que absorven y enfrían los gases a medir, salvo que la medida del oxígeno sea directamente en chimenea como O2% en base húmeda y que el instrumento “queme” todos los gases no quemados, o sea, que realmente mida el O2% “sobrante”). **Frente a esta duda siempre conviene medir, el CO2% y /o el O2%, pero además el CO o los “gases sin quemar”, utilizando un triángulos OSTWALD o haciendo un cálculo para saber el exceso de aire que realmente tenemos. Como la fórmula siguiente, cuya medida responde al uso del ORSAT, un instrumento muy antiguo y muy útil para medir gases de chimenea por absorción y cuyo resultado nos dá en base seca, sin necesidad de saber la real composición del combustible:**

$$£(ex.aire)=\frac{(1-CO2-O2-CO)}{(1-CO2-1,5\,CO-((O2-0,5\,CO)/0,21))}$$

EL triángulo de OSTWALD es fundamental para interpretar la combustión, tanto en leña como en gases.



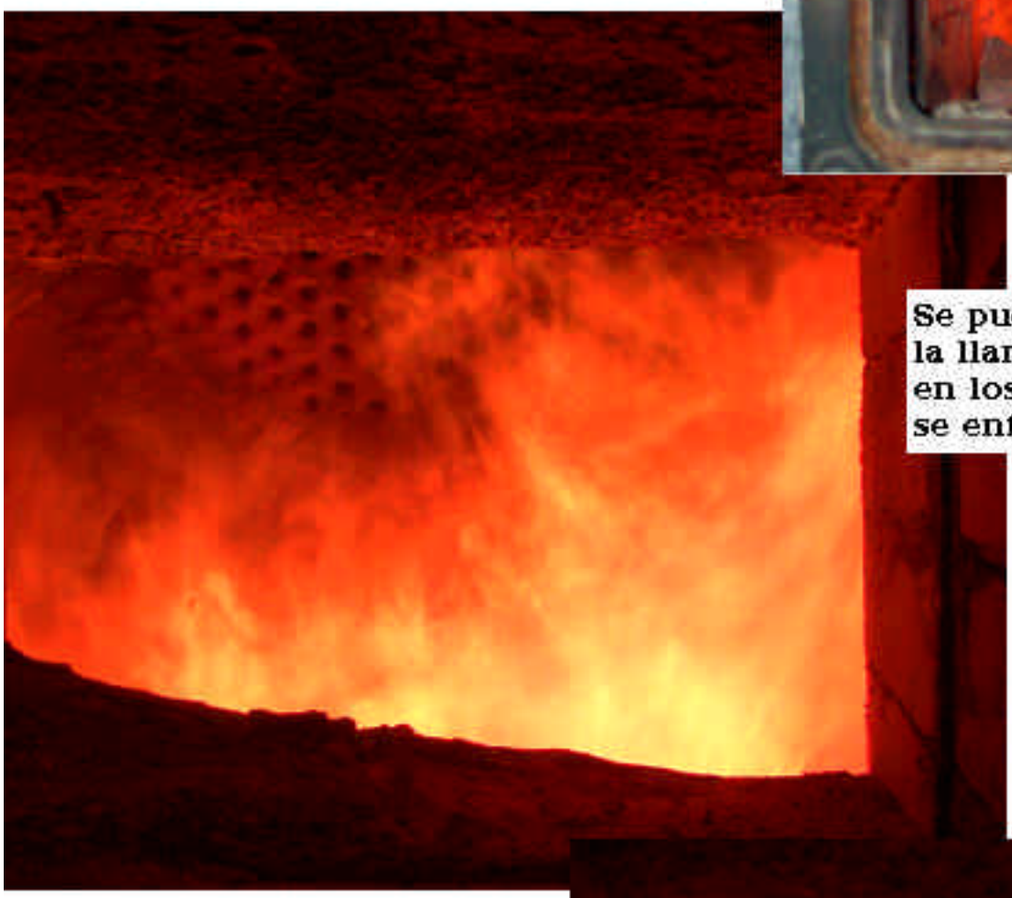
Podemos como resumen, que por lo general, el exceso de aire en combustión a leña, se corresponde al doble en % de la humedad en base húmeda. Aquí queda muy claro que el quemar leña con mucha humedad se tiene mayores pérdidas: por humedad propia de la leña, por el exceso de aire necesario y porque muchas veces no se logra la combustión completa. Las pérdidas por gases “no quemados” (entre ellos el CO y otros volátiles orgánicos) **producen en la combustión de la leña** (todos los celulósicos) **muy importantes, por eso, además de la observación de las llamas, es aconsejable la medición contínua de los gases de chimenea** (siendo el ideal automatizar los controles de los aires con los valores del O2 en chimenea y con el control del CO y los “gases no quemados”, de manera que el operador pueda “manejar” la carga de la leña y las relaciones de los aires (que si bien están automatizados, al variar la humedad y la “calidad” de la leña, responden a relaciones diferentes de combustible y aire.

Modulo 7-COMBUSTION DE LEÑA

CALDERA A LEÑA SIN HOGAR CILINDRICO (50% CAPACIDAD DE MARCHA)

Se observa la combustión desde la mirilla de observación desde el frente de la capilla.

La caldera tiene una marcha del 50%, hace un mes que no se cepillan los tubos.



Se puede observar la llama introducirse en los tubos en donde se enfría y se apaga.

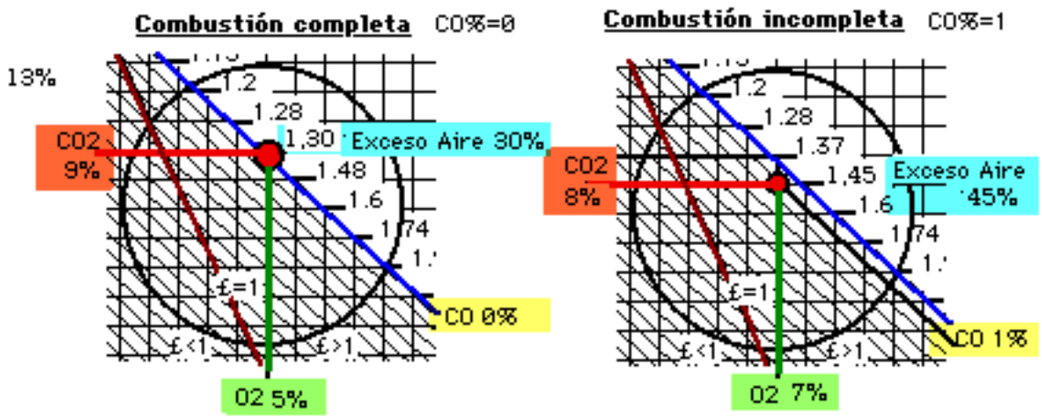
Hay zonas en que la llama se apaga al entrar a los tubos y hay zonas que probablemente haya exceso de aire.

La caldera es de 4.000 Kg/h, funciona en forma permanente por debajo del 50%, con picos de un 60% a 70% máximo.

Modulo 7-COMBUSTION DE LEÑA

El control del exceso de aire, debe hacerse con instrumentos que midan tanto el CO2% como el O2%, con un control obligado de gases sin quemar o CO , pero se debe tener en cuenta que la mayoría de los equipos de medición de celdas electro-quimicas u otros, pueden **“envenenarse” o ensuciarse al poco de usarse**, ya que los humos de chimenea en la quema de leña están por lo general, cargados de elementos orgánicos de una combustión no completa, llevando al alterado de la celda a dar lecturas falsas.

El máximo CO aceptable por seguridad es de unas 400 ppm.

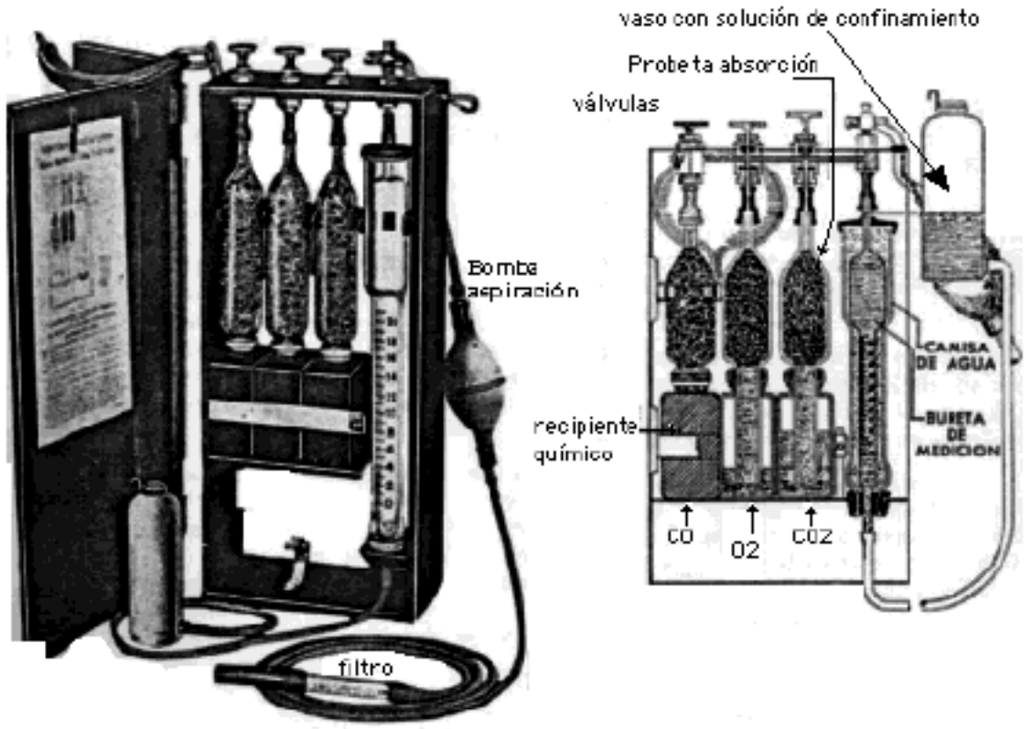


Un aparato con muchos años, que todavía se usa, tiene gran utilidad en el control de la combustión a leña, es el ORSAT, que mide por absorción el CO2%, O2% y el CO%. (si bien, su apreciación es de relativa precisión, **su lectura** y un **triángulo de OSTWALD**, lo hacen un instrumento ideal para el control de este tipo de combustión tan sucia).

Modulo 7-COMBUSTION DE LEÑA

El ORSAT

ORSAT para medición de CO2, O2 y CO



$$\pounds(\text{ex.aire}) = \frac{(1-CO2-O2-CO)}{(1-CO2-1{,}5\,CO-((O2-0{,}5\,CO)/0{,}21))}$$

EL ORSAT, es un aparato muy "antiguo", pero todavía útil para **medición de gases de combustión**, ya que si bien su medida no es de muy alta precisión, su lectura es relativamente segura si se usa en combinación con un triángulo de OSTWALD. Su funcionamiento se basa en tomar una muestra preenfriada, a través de un filtro de lana, aspirado por una bomba de goma (tipo "peluquero"), la muestra es empujada a través de una bureta de medición graduada en de 100 cm3 (que está sumergida en otro recipiente lleno de agua para mantener la temperatura de la muestra lo más estable), el gas impulsado se hace escapar a través de un vaso lleno de un líquido de "confinamiento" (líquido que no absorbe los gases y que nos permitirá subiendo o bajando el vaso, impulsar o aspirar el gas a través de los distintos líquidos de absorción). Una vez que pasó suficiente gas de chimenea por la bureta de medición (como haciendo un lavado con gases para asegurarnos su constitución original), maniobramos las válvula de entrada y escape a la atmósfera, de manera de que con el vaso enrasamos el cero (**0** equivalente a **100 cm3** de muestra, enrasando a igual nivel la superficie del líquido de confinamiento en la bureta y en el vaso, de manera de no comprimir o expandir la muestra de gas) de la bureta. Antes de hacer esta maniobra de "atrapar" 100 cm3 de gas, debemos de enrasar todos los líquidos de absorción en cada cámara de absorción (en donde están los **rellenos,** tubitos de vidrio o virutas o alambres de cobre, que se empapan del líquido de absorción para poder absorber selectivamente cada gas; esté llena hasta la marca que tiene en el cuello más fino). Luego empujaremos el gas para que entre totalmente en la primera cámara de absorción (para absorber el CO2 y SO2, anhídrido carbónico y anhídrido sulfuroso, que es absorbido por una solución fuerte de potasa), repetimos la maniobra de empujar y volver el gas a la bureta de medición tantas veces como sea necesario para que en la bureta de medición la lectura sea constante (cuidando de volver el líquido absorbente a la misma marca de enrase en su recipiente, ya que cada cámara de absorción descarga el líquido a un recipiente sellado a la atmósfera por un globo para que no entre en contacto con el aire, el líquido de absorción tiene unos 100 cm3.). **Luego, con la lectura constante, la lectura de**

cada 1 cm3 o 1 ml. será el % de CO2% (para hacer esta lectura enrasar los niveles de la bureta y del vaso, cuidando el efecto de los "meniscos" del líquido de confinamiento en ambos sean iguales).

Aquí el gas restante será menor a 100 cm3 (dado que pierde el **CO2 y SO2,** podría además perder algún gas ácido, **pero se toma todo como CO2 dado la baja influencia del SO2 y gases ácidos en el %**). **La lectura será en base seca** (gases secos). Ahora **absorberemos el O2** (utilizando para ello como absorbente al ácido pirogálico, un derivado de la madera, que no debe estar en contacto con la atmósfera, porque sino pierde efectividad debido a la presencia del O2 del aire). **Una vez absorbido el O2, la medida en la bureta será el faltante del CO2+SO2+O2, por lo que el O2% será la diferencia entre esta lectura y la anterior del CO2%** (+SO2)**.** Luego absorberemos el **CO** (para ello usaremos una solución con cloruro cuproso), **la lectura de esta medida será el CO2+SO2+O2+CO, por lo que el CO% será esta lectura menos la anterior.**

Los líquidos de absorción deben ser preparados en la medida que se observen problemas de absorción (hay que repetir la maniobra muchas veces para absorber, ya la coloración y la viscosidad dan una idea de que hay una cambio en los mismos, especialmente en el pirogálico y el cuproso, teniendo en cuenta que el **cuproso es venenoso**).

Luego para una mejor utilización del ORSAT y su interpretación, conviene utilizar un diagrama de OSTWALD, ya que si bien podemos saber el exceso de aire **por medio de una fórmula en la que intervienen los 3 elementos medidos** (CO2%,O2% y CO%, ver abajo una fórmula para calcular el exceso de aire con combustión incompleta, en la que participan el CO2 , O2, CO, en relación seca) **sin necesidad de conocer la composición del combustible**, cosa que para trazar el triángulo de OSTWALD es necesario conocer su composición (no olvidar que el triángulo de OSTWALD es la relación de l**os gases de combustión en relación seca** o sea con el vapor de agua condensada).

ANÁLISIS DE GASES DE CHIMENEA CON ORSAT

Soluciones para utilizar con el ORSAT para la absorción de los gases.

GASES DE CHIMENEA:

Se ponen, sucesivamente, en contacto 100 partes de gases de chimenea con absorbentes, los cuales absorben CO2, O2 y CO. La reducción en volumen, después de la absorción, da directamente el contenido de estos gases en volumen. Los gases restantes son N2.

1- Sello de Líquido. (solución de confinamiento).

Se disuelven 35.9 g. de sal común (NaCl) en 100 ml de agua destilada. Esta solución se acidifica con un poco de ácido clorhídrico o ácido sulfúrico y se tiñe con naranja de metilo.

2- Solución de absorción de dióxido de carbono (CO2)

Se disuelven 27 partes en peso de hidróxido de potasio PPA (KOH) en 73 partes en peso de agua destilada. (Solución al 27% de hidróxido de potasio, densidad = 1,37 Kg/l)

3- Solución de absorción de oxígeno. (O2)

Solución alcalina de pirogalol.

Se disuelven 22.5 partes en peso de potasa (KOH) y 15 partes en peso de pirogalol en 26,25 partes en peso de agua.

4-Solución de absorción de monóxido de carbono. (CO)

Solución amoniacal de cloruro cuproso.

Solución madre:

Se disuelve 1 parte en peso de cloruro de amonio (NH4Cl) en 3 partes en peso de agua destilada y se agrega 0,8 partes en peso de cloruro cuproso (CL2CL2) en ausencia de aire.

Antes de usar esta solución en el Orsat, se debe colocar una parte en volumen de solución de hidróxido de amonio (NH4OH) en el frasco de absorción y se le deben agregar 3 partes en volumen de la solución madre.

Modulo 7-COMBUSTION DE LEÑA

Otras formas de preparar soluciones para el ORSAT:

1-Solución de absorción de dióxido de carbono (CO2)

Solución de potasa (KOH) al 33% . Preparación 513 g. de KOH más 805 ml de agua destilada.

2-Solución para absorber oxígeno. (O2)

Solución 1: 891 g. de KOH, 625 ml de agua destilada.

Solución 2 : 15 g. de pirogalol, 25 ml. de agua destilada caliente.

Mezclar 140 ml. de solución 1 con toda la solución 2. TAPAR INMEDIATAMENTE.

3- Solución para absorber el monóxido de carbono. (CO)

Para absorber monóxido de carbono (CO) y oxígeno.

Solución madre : Hacer solución con 35 g. de cloruro de amonio en 100 ml de agua destilada. Una vez disuelto agregar 26 g. de cloruro cuproso (Cu2Cl2)(conviene lejos del aire). Se guarda en un frasco añadiendo virutas de cobre.

Para usar mezclar un volumen de amoníaco (NH4OH) densidad 0,91 g/ml con 3 volúmenes de solución madre. Se colocan espirales de cobre hasta la superficie libre del líquido. Absorbe hasta 16 ml de CO por ml de solución.

4-Solución de confinamiento.

Solución preparada con : 142 g de sulfato de sodio anhidro (Na2SO4, anh.) 30 g de ácido sulfúrico (H2SO4 de ácido con densidad 1,84 g/ml y 965 ml de agua. Agregar Heliantina (Naranja de metilo) para colorear.

Modulo 7-COMBUSTION DE LEÑA

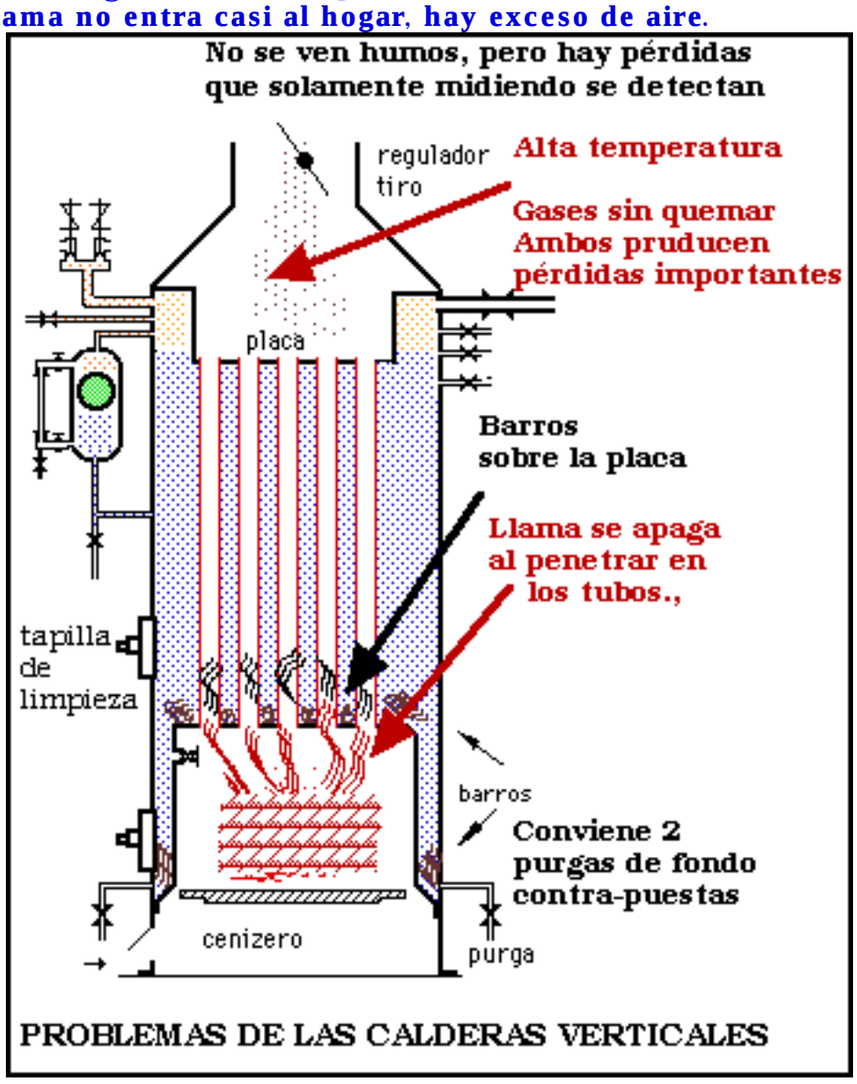
EL MANEJO DE LA COMBUSTION DE CALDERAS A LEÑA EN LA PRACTICA.

En la práctica, en las calderas humo-tubulares de quema directa, se puede monitorear la combustión observando la llama:

Si la **llama es larga y llega al “fondo” de la caldera, falta aire o hay mala combustión.**

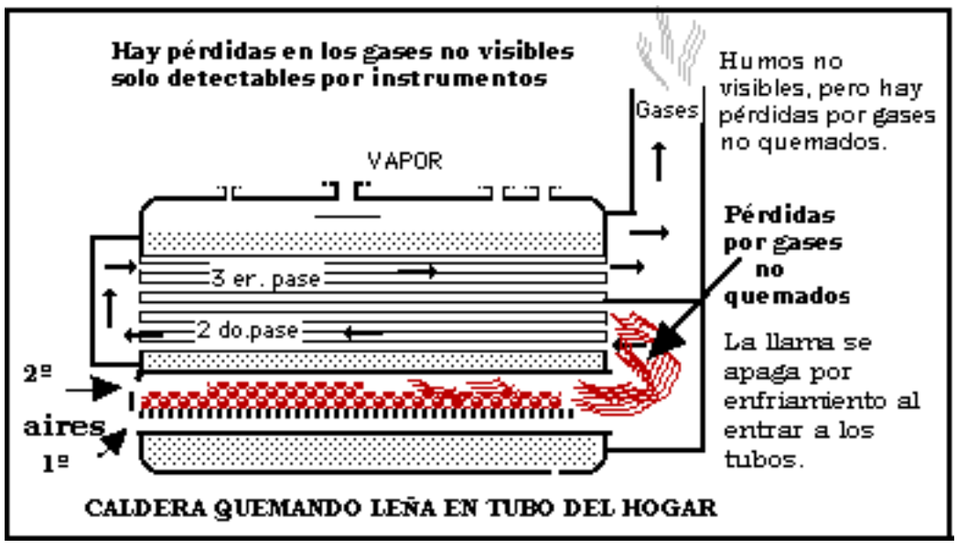
Si la llama llega a **1/3 del hogar cilíndrico, el aire es el suficiente**.

Si la **llama no entra casi al hogar, hay exceso de aire**.



En la quema de leña, las calderas verticales son todo un problema, ya que su diseño las hace proclives a que tengan pérdidas por gases “no quemados”, ya que la llama tiende a “subir” y se introduce en los tubos, se enfría y se apaga. Por eso el manejo de las calderas verticales, debe hacer cuidadosamente de no subir la altura de combustión de la leña y facilitar este efecto “enfriamiento” de la llama. **Este mismo fenómeno es lo que ocurre en las calderas de quema directa sin hogar** (una vez que la llama penetra los tubos, se apaga y con ello aparece un pérdida muy importante en los gases de chimenea por gases “no quemados” y aún con excesos de aire, si este no es bien distribuido en las grillas que soportan el lecho de combustión). Podemos también ver esta pérdida en aquellas calderas que se han adaptado a leña y queman directamente en el hogar cilíndrico (veamos estos casos).

Modulo 7-COMBUSTION DE LEÑA


Hay pérdidas en los gases no visibles
solo detectables por instrumentos
Humos no visibles, pero hay pérdidas por gases no quemados.
Gases
VAPOR
Pérdidas por gases no quemados
3 er. pase
2 do.pase
La llama se apaga por enfriamiento al entrar a los tubos.
2º
aires
1º
CALDERA QUEMANDO LEÑA EN TUBO DEL HOGAR

En la quema de leña (rolos de eucaliptos, astillas o astillones)**, las calderas humo-tubulares horizontales, adaptadas con una parrilla “seca” o “refrigerada” con agua del tanque de alimentación, en el tubo del hogar, tienen el problema que la combustión tiene poco “volumen”** (tiempo de combustión antes de llegar a los tubos de la placa trasera, en donde la llama si penetra en un tubo de la parte humo-tubular se “apaga”, quedando combustible “sin quemar”), **lo que la combustión no se desarrolla en la cantidad necesaria para mantener la capacidad de generación de vapor original de la caldera** (por ejemplo: una caldera de unos 4.000 Kg/h de vapor, con un hogar cilíndrico de buen diámetro, baja la producción de vapor al quemar leña a casi la mitad).

Esto lleva a que la caldera en combustiones de baja capacidad, el rendimiento es relativamente bueno (puede que sea de unos 4 Kg. vapor por Kg. de leña con 25%H.b.h.), **pero al aumentar la combustión al máximo posible, el rendimiento baja a valores realmente importantes** (puede que llegue a generar menos de 3 Kg. de vapor por cada Kg. de leña con 25% H.b.h.). Estas calderas no solo son de bajo rendimiento, además de bajar su capacidad de generación, sino que cuando alcanzan su máximo de producción, lo gases de chimenea están cargados de “gases sin quemar”, que son muy contaminantes).

Hay que aceptar, que cuando se llega a un 70% de la producción máxima posible de vapor (un 50% de la producción original)**, no intentar “forzar” su producción, ya que su rendimiento es muy bajo y produce contaminación. Se parecen en su comportamiento a las calderas verticales y a las calderas humo-tubulares sin tubo de hogar** (en donde se termina la combustión de los gase “ricos” y “pobres”).

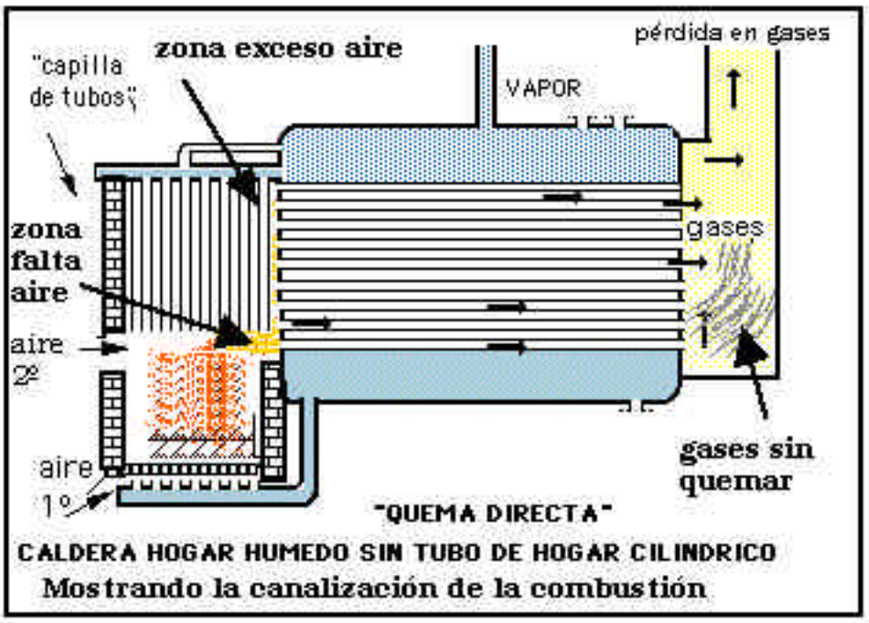
Modulo 7-COMBUSTION DE LEÑA

CALDERAS HUMO-TUBULARES ADAPTADAS QUEMANDO EN EL HOGAR

La combustión en baja tiene buen comportamiento, en alta se produce una mala combustión, ya que la llama "penetra" los tubos y se apaga.

Pueden ser grillas "refrigeradas' con circulación externa a baja presión (con agua blanda).

CALDERA QUEMA DIRECA SIN HOGAR CILINDRICO



CALDERA HOGAR HUMEDO SIN TUBO DE HOGAR CILINDRICO
Mostrando la canalización de la combustión

Modulo 7-COMBUSTION DE LEÑA

La presencia de calderas de quema directa sin “tubo de hogar” aparecen para bajar el costo de construcción de estas caldera. Pero quienes trabajamos en la práctica operando calderas (operando y evaluando su comportamiento con instrumentos), **nos queda claro que tienen limitaciones en el comportamiento de la combustión.**

Queda claro, como dijimos, que la combutión debe terminar antes de introducirse a los tubos humo-tubulares (de lo contrario la llama se apaga, se pierdo por gases “no quemados”), **pero como la llama tiene zonas más ricas de combustibles gaseosos y otras con excesos de aire, si ambas no se encuentran en una cámara de combustión, se mezclen a una temperatura superior a 600ºC, tendremos que habrá tubos que entra llama y se apaga y tendremos tubos que entran excesos de aire extraordinarios.**

Para disminuir estos efectos (partiendo de que ya tenemos la caldera), **lo más importante es tener una “grilla” de fundición adecuadamente diseñada e instalada, de manera de hacer que haya una muy buena distribución del aire entre la leña en combustión** (hay que cuidar expresamente que no entren aires por los costados de las grillas contra la paredes tubulares o de refractarios). **Además es necesario la presencia grillas “móviles” para mover la “brazas” y cenizas, que se acumulan sobre las grillas** (pretender quemar sin grillas de fundición, directamente sobre una parrilla de tubos de agua de la propia caldera o fuera de ésta, no solo no se logra una buena distribución del aire, sino que la parrilla se tapa con “brazas” y cenizas, habiendo solos zonas en que este lecho se perfora, produciendo un efecto “fragua”, o sea una altísima temperatura local, un gran exceso de aire que provoca grandes pérdidas para mantener la combustión, excesos de hasta más del 300%. Pero además se debe considerar el riesgo de quemar sobre un tubo y el efecto “fragua”, que puede llevar al tubo a “explotar”, quemando al operador.

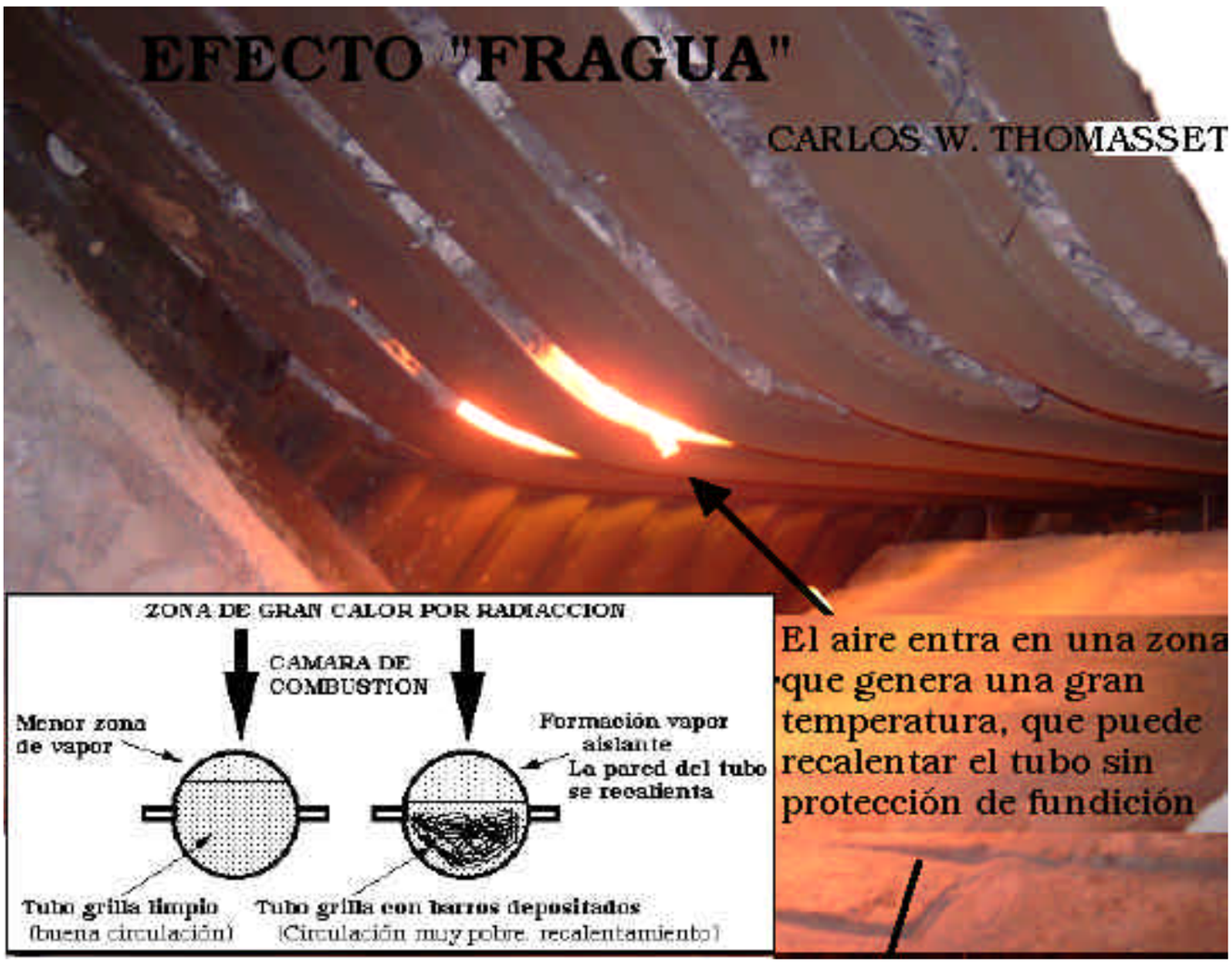
CALDERA SIN TUBO DE HOGAR
ZONA EXCESO AIRE
ZONA FALTA AIRE
Se puede observar la llama introducirse en los tubos en donde se enfría y se apaga.

La combustión sin tubo de hogar, fuera de los problemas comentados, al no lograr una combustión completa, especialmente cuando la “carga” de combustión aumenta por encima del 70%, la llama al entrar a los tubos humo-tubulares, no solo se apaga, sino que forma con la ceniza un anillo de obstrucción, que obliga a frecuentes paradas de la caldera para limpiezas de tubos (ya que la pérdida de carga en los gases obliga a limpiar, debido a que el tiro “inducido” pierde capacidad).

Dijimos que esto se puede mejorar con el agregado de unos gramos de “dolomita” por tonelada de leña (unos 50 gramos/tn). También es conveniente que la leña esté lo más seca posible, ya que la leña con una humedad por encima del 30% H.b.h. tiende agravar este problema.

Todos estos problemas de combustión deben ser resueltos, si queremos ahorrar combustible (leña) **y bajar el tenor de contaminación en los gases** (CO y otros)**.**

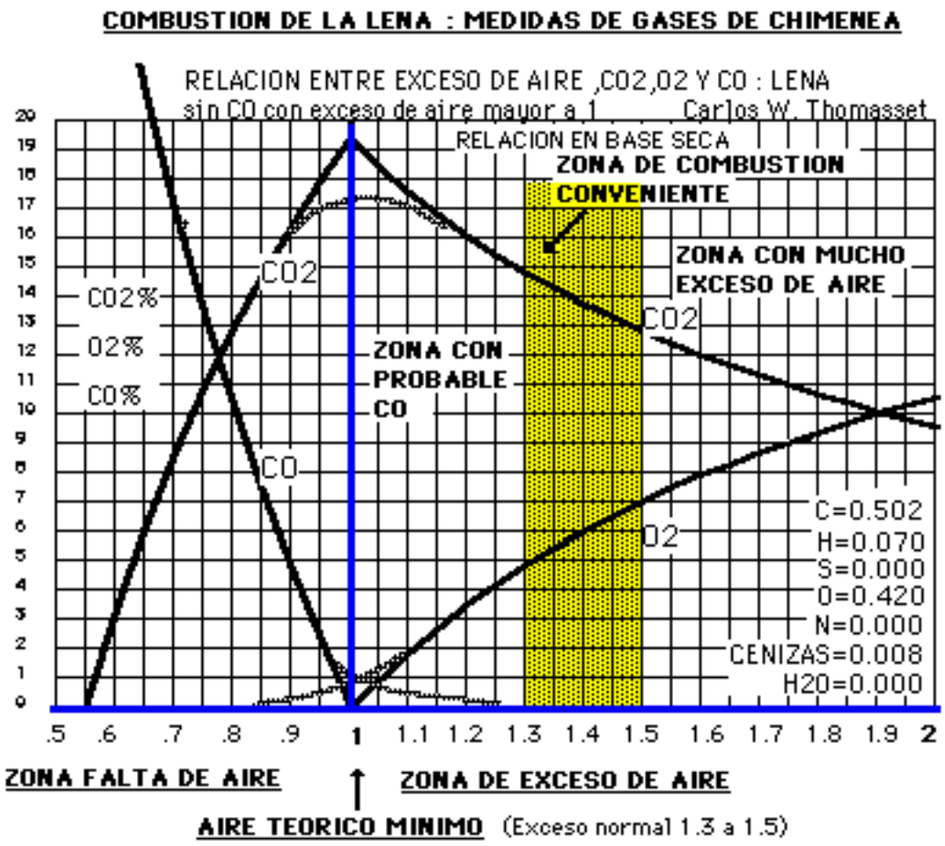
Modulo 7-COMBUSTION DE LEÑA


EFECTO "FRAGUA"
CARLOS W. THOMASSET
ZONA DE GRAN CALOR POR RADIACCION
CAMARA DE COMBUSTION
Menor zona de vapor
Formación vapor aislante
La pared del tubo se recalienta
Tubo grilla limpio (buena circulación)
Tubo grilla con barros depositados (Circulación muy pobre, recalentamiento)
El aire entra en una zona que genera una gran temperatura, que puede recalentar el tubo sin protección de fundición

El efecto “fragua” en las calderas con grillas de tubos con circulación del agua de caldera (que tiene la presión interna de la caldera, que si se revienta un tubo, se descarga el agua con la presión interna de caldera, sobre un cantidad de ‘brasas” al “rojo vivo’, que provoca un vapor de “flash” muy importante, que al expandirse puede salir por la “boca de carga” de la caldera si esta no es “sellada” o sea doble tapa. O puede salir por las mirillas o tapas del ceniceros un “ola” de vapor sobrecalentado que quemaría a una persona expuesta).

El que puede tener el efecto “fragua” (o sea el recalentamiento local), **depende no solamente de la gran temperatura local de la llama por la entrada de aire que “sopla” sobre el carbón de las “brasas”, sino que estos tubos por ser semi-horizontales o casi horizontales, alimentados por aguas de la parte baja de la caldera, traen “barros” de la dureza precipitada cuando entran agua duras y que quedan estacionados en la mitad inferior de los tubos, impidiendo la libre circulación del agua de enfriamiento de los tubos, pero además por la parte superior va el vapor y los gases que se han generado, lo que hace que la zona que el tubo recibe más calor, queda expuesta a menor enfriamiento y con ello mayor riesgo de que pueda el metal “recalentarse” y estirarse por su deformación plástica, reventar y provocar las consecuencias ya dichas. La solución es ponerle grillas de fundición especialmente diseñadas para dichas calderas. Aleja el riesgo y mejora la combustión.**

Modulo 7-COMBUSTION DE LEÑA



El gráfico anterior, son curvas teóricas de los gases de chimenea (en base seca), **que en la realidad no se cumple tan facilmente, ya que corresponden a combustiones totales. Generalmente aún con grandes exceso de aire** (dependiendo del tipo de caldera y sistema de combustión) **tenemos “gases sin quemar” y aún faltando aire, tenemos oxígeno libre en chimenea, por eso esta curva la podemos considerar teórica y nos conviene referirnos al triángulo de OSTWALD, que permite mostrar las relaciones de los gases en forma más real** (o utilizar la fórmula que hemos dado, sabiendo el %CO2, %O2, %CO).

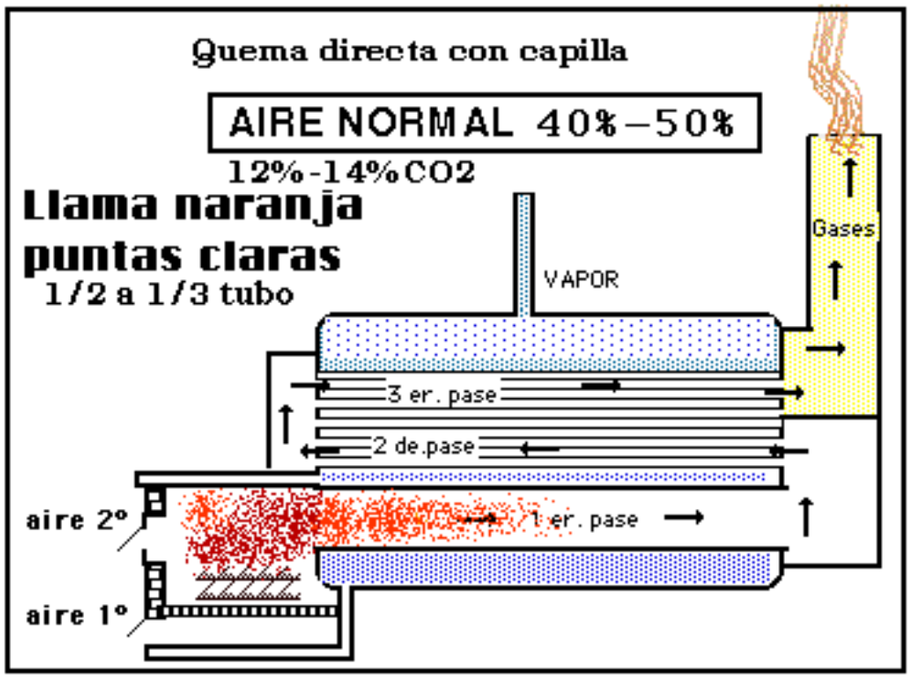
Regulación de la combustión en la quema directa :

1- Falta de aire: como no se presentan **humos** negros (generalmente **apenas blanquecinos, como** "**vapores**", o si la falta de aire es muy notoria puede hacer humos algo negruzcos) la **medición de los gases** juega un papel **importante,** ya que no habiendo humos puede haber un CO2 del 16% a 18% con presencia de CO en forma importante (por cada 1% de CO la pérdida por gases sin quemar en chimenea puede ser de más del 5%). A veces es preferible mantener el CO2 entre 14% y 16% para evitar la posibilidad de formación de CO (ya que además de la pérdida de energía, junto con el monóxido de carbono van alquitranes que tienden a ensuciar las superficies de intercambio). Puede haber una falta real o aparente del aire. Ambas son provocadas por la utilización de leña con **mucha humedad** (más del 35% de humedad), hogar con **carga de leña en exceso** (no permite la entrada de aire bajo la parrilla en forma pareja y se produce "destilación"), **exigir demasiado** la capacidad de la caldera, **aires mal** regulados, "**parrillas**" **tapadas** de cenizas (por falta de limpieza), falta de **remoción o atizado de la leña** sobre la "parrilla", **caldera sucia** con pasajes de aire restringidos: tubos tapados, sucios de cenizas , etc..

La **cantidad de combustión se regula** con la **cantidad de aire que forzamos** (o succionamos con el tiro) **debajo de las grillas** ("parrilla"), para una altura dada de leña. Con el **aire secundario regulamos el largo de la llama** (completamos la combustión en regímenes altos) y con **el tiro inducido** (o natural) **mantenemos una depresión en el hogar** (- 3 a - 5 mm.c.a. : milímetros de columna de agua) de manera de manejar el volumen resultante de los gases de combustión (y la succión del aire primario y secundario si no hay forzadores).

Para mantener una **idea práctica de la combustión**, debemos **observar el fuego** en el tubo central del hogar o sobre el banco convectivo (caldera acuo-tubulares). La combustión **no debe llegar al fondo del hogar** o al banco convectivo, **debe terminar antes de que la llama se enfrie**. Al medir los gases de chimenea, es conveniente disponer un **triángulo de OSTWALD** para leña y así poder comprobar que las 3 lecturas cierran en un punto del triángulo (son coherentes).Ver capítulo de Eficiencia.

Modulo 7-COMBUSTION DE LEÑA



2- Buena combustión :

En este caso no se ve prácticamente **nada en la chimenea** (un leve velo vaporoso o nada), el CO2 estará entre 14% y 16% , el O2 3,5% a 6%, el CO será 0%.

Observando la llama como guía, esta **debe entrar en el tubo central** del hogar **hasta la mitad** del mismo (en el banco convectivo de las acuotubulares, **debe de "lamer" los tubos**).

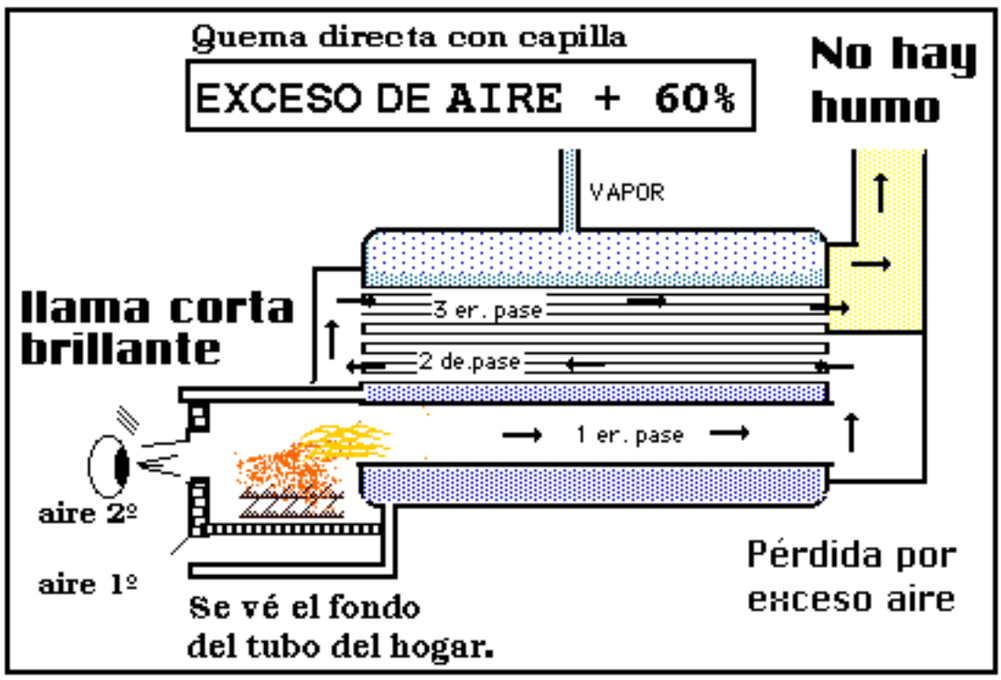
Regule con el aire secundario y/o la carga de leña para acortar o alargar la llama. Para **mantener estos valores** es aconsejable **cargar en períodos cortos**, **remover la leña** entre períodos, usar **leña relativamente seca** (25% a 30% de humedad), **no sobrecargar** el hogar con leña, mantener la "**parrilla" (grillas) limpias**, siendo muy conveniente que la **depresión** del hogar (tiro inducido) y el **aire primario** (forzador bajo grilla) **sean automáticos** (la depresión del hogar entre -3 a -5 mm.c.a, con sensor de depresión comandando el tiro, modulando una válvula de gases de mariposa o persiana, etc., y la alimentación forzada bajo grilla comandada en forma modulante con la presión del vapor : al bajar la presión aumenta el aire y viceversa). La automatización permite un marcha muy regulada, quedando sólo el manejo de la leña y del aire secundario (que también se puede automatizar).

De todas maneras si la presión llega a un máximo, cerrando los aires y gases, un presóstato apagará el tiro inducido y el forzador bajo grilla.

Recuerde: no abra la puerta de carga ni las tapas de observación estando los tiros apagados.

En caso de que la presión debido a una inercia térmica subiera por encima de la presión de trabajo, saltaría la primer válvula de seguridad o válvula de servicio de línea. Como la quema directa tiene una gran vaporización en la cámara de combustión (la "capilla" se encuentra expuesta al calor radiante y vaporiza desde un 40% a un 60%), la caldera **tiene una gran respuesta** a los cambios exigidos de vaporización .

Modulo 7-COMBUSTION DE LEÑA

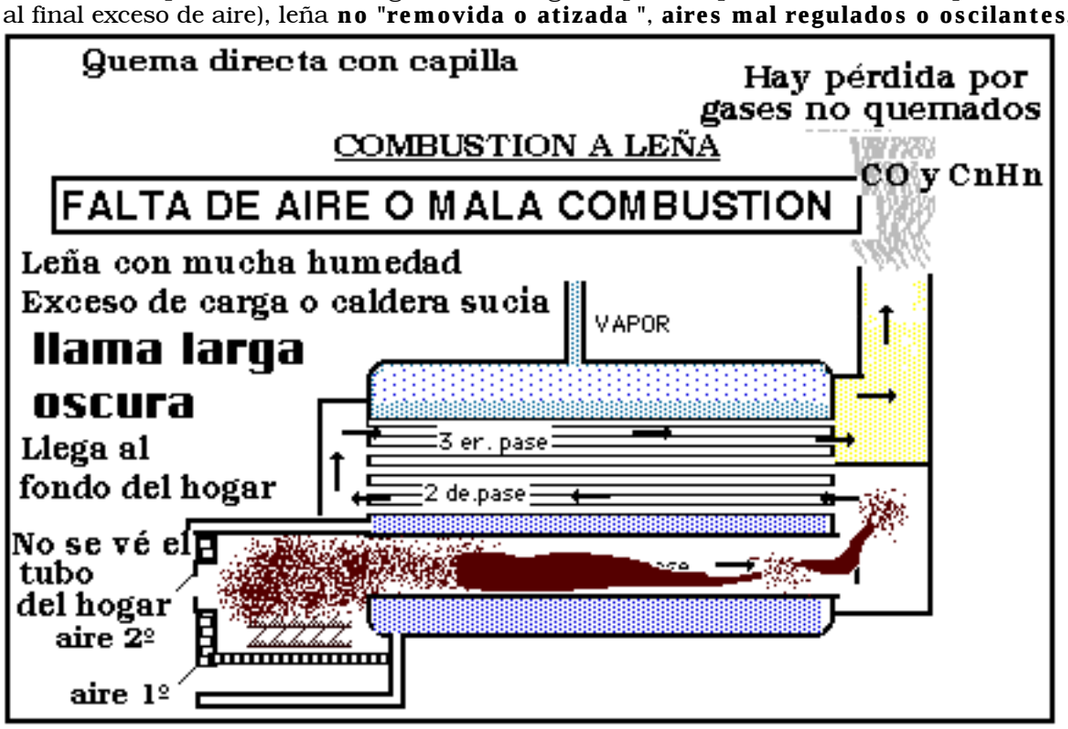


3- Exceso de Aire:

En este caso, en la **chimenea** no se observa **nada** (solo gas caliente). El CO2 estará por debajo del 12%, el O2 por encima del 8% y nada de CO (podrá haber algo de CO en algunos casos: llama fría). La observación de la **llama: se ve muy corta**, el **tubo central del hogar vacío** de llama. La **causa** de ésto se debe a: **carga** de leña muy **baja**, "**parrilla**" **mal tapada** de leña, **entrada de aire** exagerada por encima de la "parrilla", **depresión** del hogar **muy alta** (más de 5 mm.c.a.), **no** "**atizado**" de los fuegos, **mala regulación** de los automáticos de los aires, entradas de aires indebidas, etc..

4- Mala combustión:

La mala combustión **puede existir** a pesar de que la **cantidad** de **aire** y de l**eña sea la correcta**. La llama podrá ser larga en determinados momentos y corta en otros y generalmente se puede deber a **leña excesivamente húmeda** (más del 40% de humedad, es necesario más exceso de aire a medida que aumenta la humedad), **cargas demasiadas espaciadas** (esto obliga a sobrecargar la parrilla produciendo en los primeros momentos falta de aire y al final exceso de aire), leña **no** "**removida o atizada** ", **aires mal regulados o oscilantes**, **caldera sucia**, etc



Modulo 7-COMBUSTION DE LEÑA

Quema de leña por gasógeno :

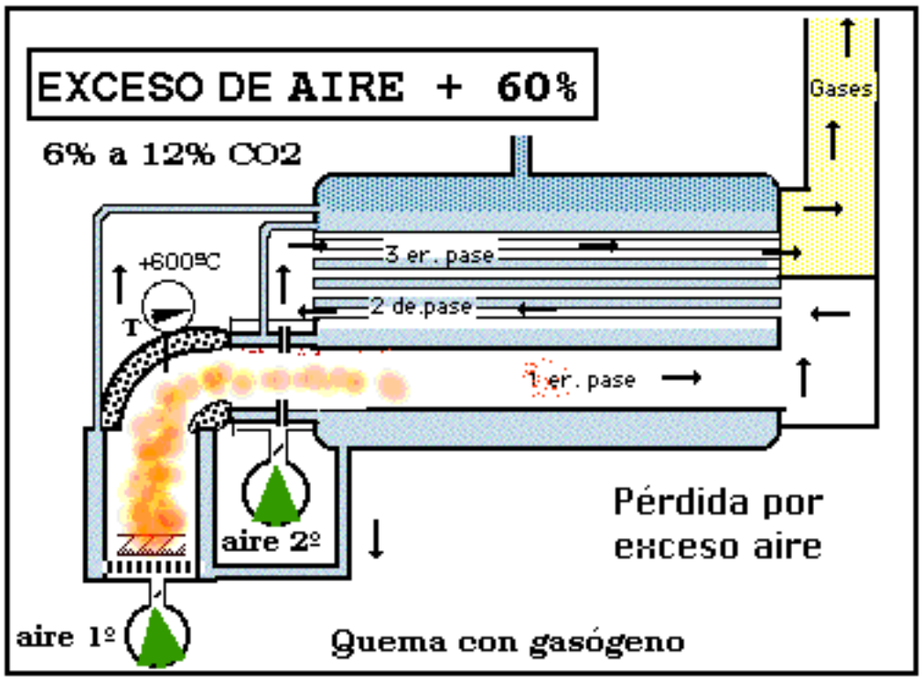
El gasógeno debe ser prendido con mayor cuidado que la quema directa. Se deben tener todas las precauciones anotadas anteriormente, a las que hay que sumar el hecho de que tenemos una **combustión primaria** y luego el **gas producido se debe quemar** en una **combustión secundaria separada de la primera** en el hogar de la caldera. **Primero se prende el gasógeno**, haciendo funcionar el tiro. En el primer momento la combustión en el interior del gasógeno será total con muy poca formación de gases (hay un exceso de aire en el interior del gasógeno debido a la relativa combustión de comienzo). Luego se verá que **la temperatura de los gases de entrada a la cámara** de combustión de la caldera empieza a **subir** (indicando que el volumen de gasificación empieza a ser importante), aumentando posteriormente el aire primario (y la carga de leña) la **riqueza de los gases** (CO y otros) **aumenta.** En este momento se debe tener una **llama piloto en la cámara de combustión de la caldera** (generalmente a gas de garrafa o quemador auxiliar a gas-oil) que **se mantendrá prendido**. Dando **lentamente aire secundario** se logra que entre la producción de **gas del gasógeno** y el **aire secundario** que se hace llegar (generalmente algo calentado si la caldera esta caliente o frío si la caldera esta fría) **se establezca una llama secundaria estable** (al principio se producirá una llama muy **poco estable**: pocos gases y aire frío, con tendencia a producir "pulsaciones").

En algunos gasógenos, si bien hay combustión secundaría, por ser la unión entre la caldera y el gasógeno de gran sección y corto pasaje, la combustión secundaria es en realidad una "prolongación" de la combustión primaria, no necesitándose en estos casos la presencia de llamas pilotos.

La **llama secundaria** se podrá chequear por las mirillas. En la chimenea al principio se notan muchos gases "sucios" que luego desaparecerán (a medida que la temperatura de los gases que entran en la cámara de combustión secundaria aumenta, la llama se estabiliza). La **regulación** del **aire secundario** se debe hacer por **instrumentos** o mirando una "**llama " poco visible** (de color pálido azulado), tratando que la misma se ejecute sin llegar al "fondo" del hogar (ya que al entrar a los tubos de humo se apaga, ensuciando los mismos muy rápidamente, subiendo la temperatura de chimenea y restringiendo el pasaje de gases a los pocos días) y la **cantidad de aire secundario** estará en **relación** a la cantidad de **aire primario** (de acuerdo a la necesidad de vaporización de la caldera). La **carga de leña** se **regula** por la **altura** de la misma y por la **temperatura de los gases a su salida** en el gasógeno (ya que la misma refleja la altura del "lecho" de astillas o rolos cortos sobre la "parrilla", bajando con una sobrecarga -gas muy rico- o subiendo momentáneamente al bajar el "lecho" hasta cierto valor y luego bajando por falta de combustible para gasificar: recordar que la gasificación perfecta produciría 1/3 aprox. del calor disponible en el interior del gasógeno). **Se debe tratar** de **no dejar bajar el "lecho"**, ya que se producen **altas temperaturas** (por la alta velocidad del aire localmente) y no se deben extraer las cenizas totalmente, ya que se pueden "**quemar" las "grillas**" (soporte normalmente giratorio). La **llama secundaria** debe ser "**monitoreada" permanentemente** y en el caso que deba apagarse, el **reencendido debe ser piloteado** (restableciendo el aire secundario lentamente) o de lo contrario se producirán **explosiones o llama inestable** en el hogar. En algunos casos no se necesita llama piloto (reencendido directo desde el gasógeno).

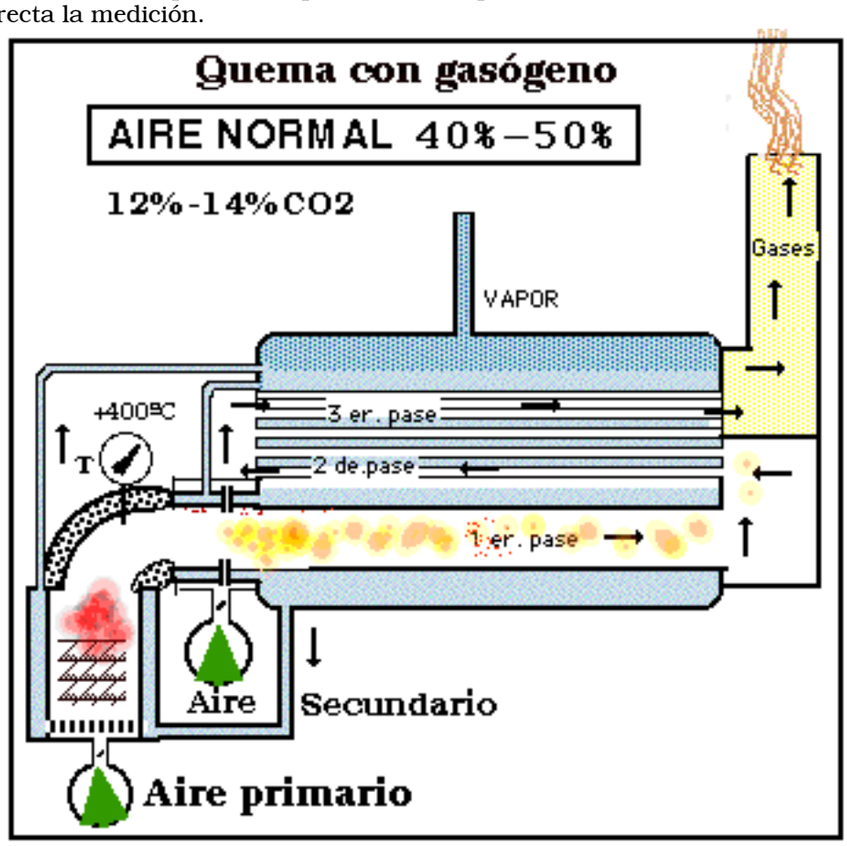
La combustión se regula con el aire primario y el aire secundario a la vez, debiéndose tener en cuenta la carga de leña , ya que cualquiera de los 3 elementos puede afectar la condición de un buen rendimiento (a más necesidad de combustión, se necesitan más gases -aumentando el aire primario -para quemar en el hogar con más aire secundario).

Regulación de la combustión por gasógeno a leña:



1-Exceso de aire :

La **llama secundaria** muy corta , **hay fuego** (llama luminosa) en el interior del **gasógeno** , el CO2 es menos del 12% , el O2 más del 8%. No hay humos en chimenea y la temperatura de los gases combustibles es alta (si hay suficiente leña en el gasógeno). Al usar instrumentos para medir los gases de chimenea es conveniente utilizar un **triángulo de OSTWALD** para leña, para verificar que las lecturas cierren en un "punto": así se puede establecer que es correcta la medición.

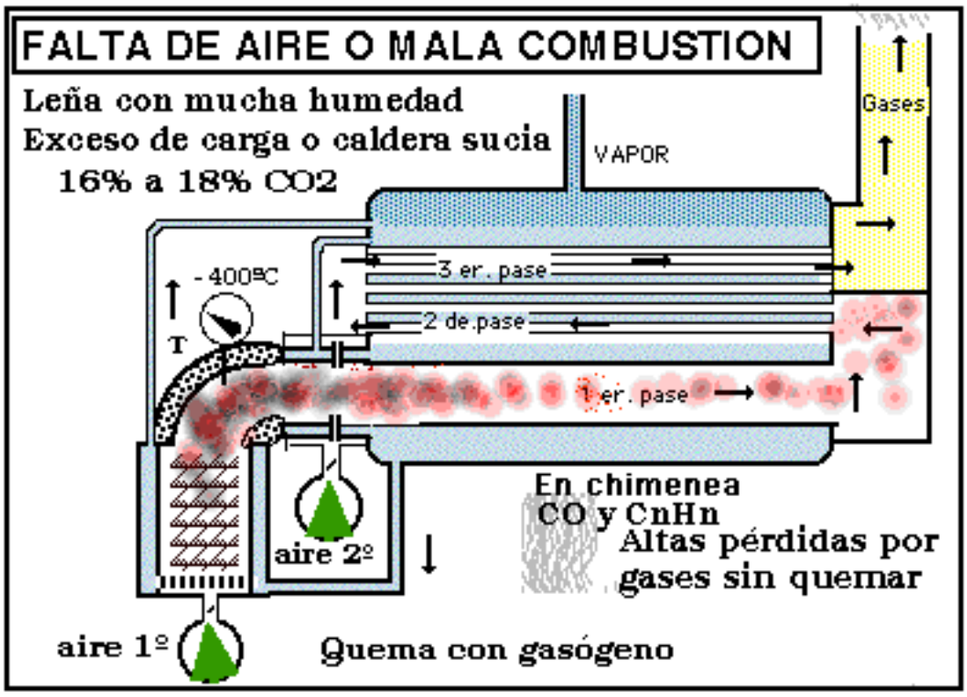


2-Buena combustión:

En este caso, **no hay humos**, la **llama secundaria** llega hasta **casi el final del hogar** de la caldera (aunque el final de la llama es casi imposible observar), la **carga** del gasógeno es **correcta** (altura), la temperatura de los gases es de un valor intermedio , el CO2 es más del 14% , el O2 es menos del 6% y **no debe haber presencia de gases no quemados** (CO% igual a cero). El monitoreo de la llama en forma práctica se hace difícil debido a la falta de luminosidad en la combustión secundaria, por lo que se debe tener mucha experiencia para lograr estos valores. La afectan las condiciones que hemos dado en general para la leña, pero la humedad de la leña es menos tolerable (aconsejándose no trabajar con leña con más del 30% de humedad, leña limpia de eucaliptos , preferiblemente sin cáscara).

3-Falta de aire :

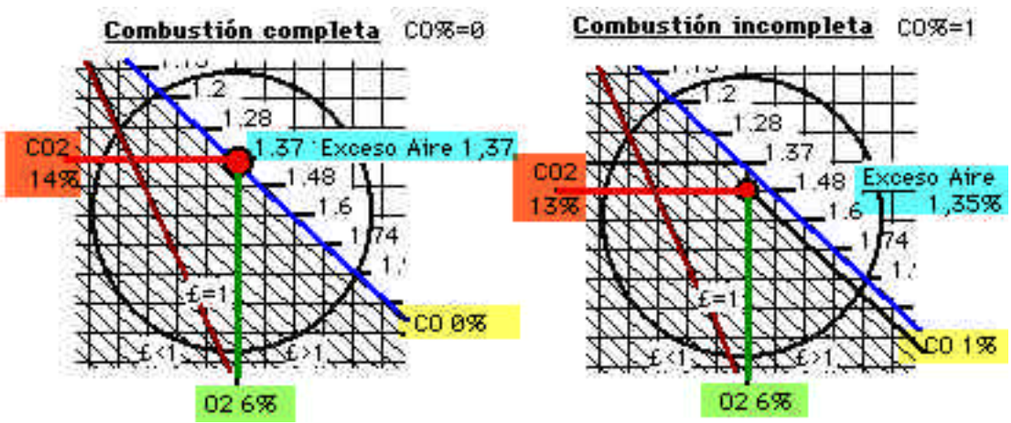
En este caso, se notan **algunos humos blanquecinos** (a veces negruzcos si la falta de aire es muy grande), el CO2 en más del 16% , el O2 es menos del 3,5% y **hay presencia de gases no quemados** (**CO, acompañado por volátiles y alquitranes que tienden a ensuciar la caldera y a "corroer" la chimenea metálica: zonas frías**). La **llama secundaria** se ve "**sucia**", **muy larga** (toca la mirilla posterior). La **causa más común** de esta situación es la **falta de regulación** de los aires y la carga de leña: **sobrecarga**, **humedad de la leña**, **calidad de la leña** (leña sucia, mucha cáscara, etc.), **caldera sucia**. Esta situación hace que en pocos días la caldera se ensucie y pierda capacidad de vaporización y combustión (por falta de transferencia y pasaje de gases, esto se nota al subir muy pronunciadamente la temperatura de chimenea, que hace bajar la Eficiencia de la caldera).



4-Mala combustión:

Modulo 7-COMBUSTION DE LEÑA

En este caso, a pesar de ser **la cantidad total de aire la necesaria**, por razones de ajustes, **no se logra la combustión total**, quedando **gases sin quemar** que son detectados en la chimenea (CO) y se **produce el ensuciamiento rápido** de la caldera (con elevación de la temperatura de los gases de salida y bajando la capacidad de vaporización de la caldera). Una de las **causas** que más afecta esta condición, es la **humedad de la leña** (más del 30%) que provoca que la **combustión** secundaria sea **muy fría** y necesite **mayor tiempo** en el hogar (llegando al final del hogar sin terminar su combustión). **Otra causa es la sobrecarga** de la capacidad de la caldera y como **la vaporización depende fundamentalmente de la llama secundaria**, ya que en el **gasógeno la transferencia es mínima**. Al verse disminuida la respuesta por esta razón, la caldera tiende hacer sobrecargada de combustión para lograr recuperar la presión, no siendo en estas condiciones la cámara de combustión secundaria lo suficientemente grande como para "dar" el tiempo necesario para finalizar su combustión, sobrando oxígeno y gases sin quemar. Esta característica obliga al encargado de la caldera a permanecer atento a las necesidades del consumo de vapor, siendo necesario que prevenga estas situaciones con antelación.



El las gráficas anteriores (partes de un triángulo de OSTWALD de leña) , se indica la condición de combustión completa (CO=0%) y la condición en que la combustión no es completa (CO%=1) aunque sobre el O2 (oxígeno), esto en las calderas a leña y de gases (como el gas natural), **hace que se produzcan pérdidas muy importantes por gases sin quemar (que por cada 1% de estos gases que se midan en chimenea se puede estar perdiendo más de 4% del combustible por la chimenea.**

Para **parar la caldera** se sigue los comentarios anteriores en la quema directa, cuidando que bajo ninguna circunstancia quede leña sin quemar sin ser atendida la alimentación de agua de la caldera, si es necesario volver a prender, tener la precaución de "barrer" los gases y formar gases nuevos antes de prender la llama piloto y dar aire secundario. (Seguir las instrucciones del fabricante).

Al **parar** es conveniente dejar "asentar" unos minutos los barros (la válvula de vapor estará cerrada) y **purgar de fondo** (especialmente el gasógeno que tiende a juntar barros debido a que su circulación no se establece en fase líquida: tipo sifón) y los controles de nivel (como todas las calderas).”